



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2004 056 393 A1** 2006.05.24

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2004 056 393.4**

(22) Anmeldetag: **23.11.2004**

(43) Offenlegungstag: **24.05.2006**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **G01B 15/02** (2006.01)  
**G01N 22/00** (2006.01)

(71) Anmelder:  
**SCHOTT AG, 55122 Mainz, DE**

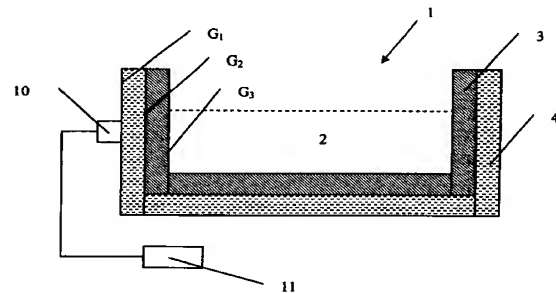
(74) Vertreter:  
**Fuchs, Mehler, Weiß & Fritzsche, 65201  
Wiesbaden**

(72) Erfinder:  
**Wilke, Thorsten, Dr., 55232 Alzey, DE; Eichhorn,  
Uwe, Dr., 55126 Mainz, DE; Däubner, Manfred,  
65203 Wiesbaden, DE**

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Messung der Wandstärke von Schmelzaggregaten**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Verfahren zur Messung der Wandstärke von mit Schmelze gefüllten Schmelzaggregaten beschrieben, deren Wand mindestens ein Schicht aus Feuerfestmaterial aufweist. Hierzu werden an der Außenseite Radarstrahlen in die Wand eingestrahlt, wobei die an dielektrischen Übergängen reflektierten Radarstrahlen gemessen werden und aus den der Laufzeit des dem Übergang der Wandinnenseite-Glasschmelze entsprechenden Reflexen die Wandstärke ermittelt wird.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Messung der Wandstärke von mit Glasschmelze gefüllten Schmelzaggregaten, deren Wand mindestens eine Schicht aus Feuerfest-Material aufweist.

**[0002]** Schmelzaggregate werden zum Beispiel zum Erschmelzen von Glas verwendet. Typische Glaswannen bestehen aus Feuerfestmaterial und sind außen mit in der Regel feuerleichtem Isolationsmaterial verkleidet. Als feuerfestes Material wird in der Regel ein Material auf Quarzbasis, wie z.B. Quarzal oder AZS, oder auch zirkonhaltige Materialien (HZFC) verwendet.

**[0003]** Um die Sicherheit von Mensch und Maschine gewährleisten zu können, ist es wichtig, den Korrosionsfortschritt der feuerfesten Materialschicht zu kennen. Die Kenntnis der Restdicke dient dazu, den optimalen Zeitpunkt zum Löschen der Wanne zu bestimmen, mögliche Schwachstellen zu erkennen und rechtzeitig Wartungsarbeiten durchführen zu können.

## Stand der Technik

**[0004]** Bisher sind diverse Methoden zur Bestimmung des Korrosionsfortschrittes an in Betrieb befindlichen Glasschmelzwannen bekannt. Eine umfassende Darstellung findet sich in Bernhard Fleischmann, Glastechnischer Bericht, Glass Sci. Technol. 74 (2001) Nr. 4. Über beispielsweise Thermoelemente, die im Wannenboden installiert sind, kann indirekt die Restdicke der feuerfesten Steine abgeschätzt werden. Man kann versuchen, durch regelmäßige Begehungen den Verschleiß der feuerfesten Materialien durch optische Kontrollen festzustellen. Überwiegend angewendet werden mechanische Verfahren wie das Verwenden von Haken oder Merglometern zum ertasten der Fugentiefe zwischen den Steinen. Das Verwenden eines Hakens zum Abtasten der Restdicke hat den Nachteil, dass nur an bestimmten Stellen, an denen Durchführungen vorhanden sind, die Restdicke gemessen werden kann. Außerdem wird der Haken durch die Temperatur deformiert und die Messergebnisse sind extrem personenabhängig. Die Verwendung eines Merglometers beschädigt außerdem die Steine an den Fugen.

**[0005]** Basierend auf einer Temperaturmessung kann zum Beispiel ein Thermoelement an der Wand angebracht werden. Ein Thermoelement erfasst allerdings nur eine Fläche mit einem Radius von ca. 30 cm. Man kann mithilfe von Pyrometern oder einer Thermokamera die Wanne kontrollieren. Dabei ist es allerdings problematisch, dass die Oberflächenbeschaffenheit der Wand die Messung beeinflusst. Verfahren, die auf der Messung der Rückerwärmung bzw. des Wärmeflusses basieren, sind noch nicht ausgereift.

**[0006]** Man hat auch versucht, mechanische Wellen für die Restwanddicke einzusetzen. Akustische Schallwellen werden zu stark im Feuerfest-Material gedämpft. Ultraschallwellen werden an Rissen und Inhomogenitäten total reflektiert.

**[0007]** Das so genannte Saveway-Verfahren beruht auf dem Effekt, dass die elektrische Leitfähigkeit von feuerfesten Materialien mit steigender Temperatur größer wird. Für die Langzeitanwendung an Glasschmelzwannen ist allerdings bisher ungeklärt, wie sich die Diffusion von alkalischen Substanzen bei der Herstellung von Spezialgläsern in die Feuerfeststeine hinein auf deren Leitfähigkeit auswirkt.

**[0008]** Bei der Verwendung zirkonhaltiger Feuerfeststeine kann auch deren radioaktive Eigenstrahlung zur Restwandstärkebestimmung verwendet werden. Diese so genannte Isotopenmethode ist allerdings erst bei einer Restwandstärke < 100 mm einsetzbar.

**[0009]** Es ist auch bereits versucht worden, die Restwanddicke über Laserabstandsmessungen zu ermitteln. Insgesamt ist dieses Verfahren allerdings ungeeignet, da keine Erfassung unterhalb der Glasbadoberfläche möglich ist und der Einfluss der heißen Oberofenatmosphäre zu Fehlmessungen führt.

## Aufgabenstellung

**[0010]** Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren zu finden, bei dem die Nachteile des Standes der Technik vermieden werden.

**[0011]** Gelöst wird diese Aufgabe durch ein Verfahren zur Messung der Wandstärke von mit Glasschmelze gefüllten Schmelzaggregaten, deren Wand mindestens eine Schicht aus Feuerfest-Material aufweist, bei dem Radarwellen an der Außenseite in die Wand eingestrahlt werden, die an dielektrischen Übergängen reflektierten Radar-Strahlen gemessen werden und aus den der Laufzeit des dem Übergang Wandinnenseite – Glasschmelze entsprechenden Reflexen die Wandstärke ermittelt wird.

**[0012]** Das Radarsystem basiert auf einem Impuls-Echo-Verfahren, bei dem in dem zu untersuchenden Bereich elektromagnetische Impulse gesendet werden, die in Abhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften des Messobjektes reflektiert und vom Radargerät detektiert werden. Aufgrund von Diskontinuitäten in der dielektrischen Eigenschaft der Zielregion ist man in der Lage, unterschiedliche Strukturen und Schichten zu erkennen. Für zerstörungsfreie Inspektionen oder Baugrunduntersuchungen bei Hoch- und Tiefbaumaßnahmen bzw. in der Archäologie wird bereits auf solche Radargramme zurückgegriffen. Allerdings wird in diesen Bereichen bei Temperaturen nahe Zimmertemperatur gemes-

sen und sollen Strukturen detektiert werden, bei denen starke Unterschiede in der Dielektrizität vorliegen, z.B. Stahlträger in Beton, was zu ausgeprägten Signalen im Radargramm führt.

**[0013]** Erstaunlicherweise hat es sich herausgestellt, dass die Auflösung üblicher Radargramme ausreicht, um auch Dielektrizitätsunterschiede, wie sie zwischen Feuertest-Material und Glasschmelze bestehen, zu detektieren. Auch bei hohen Temperaturen von über 1000°C lassen sich die Messungen durchführen. Hierbei hat sich herausgestellt, dass sich die Laufzeit der Reflexe verringert und die Intensität der Reflexe abnimmt. Um die erforderliche Genauigkeit zu erzielen, ist es von Vorteil, die Messkurven einem geeigneten mathematischen Auswertungsverfahren zu unterziehen. Außerdem sollte das Radargerät thermisch abgeschirmt werden.

**[0014]** Überraschend ist das erfindungsgemäße Verfahren auch in Hinblick auf den Artikel von Bernhard Fleischmann Glastech. (Bericht, Glass Sci. Technol. 74 (2001) Nr. 4. In dieser Veröffentlichung wird von der Verwendung von Mikrowellen abgeraten, die sich im Frequenzspektrum an Radarwellen anschließen, da sie zu stark im Feuerfeststein absorbiert würden und daher eine praktische Nutzung der Mikrowellen zur Bestimmung der Restwanddicke an heißen Steinen nicht möglich sei.

**[0015]** Die Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens sind vielfach: Es ist einfach zu bedienen und nahezu überall einsetzbar, insbesondere ist es mobil. Verglichen mit bisher bekannten Verfahren ist es wirtschaftlich sehr interessant, da nur die Verwendung von Haken billiger ist, bei einer vergleichbar geringeren Genauigkeit. Das Verfahren ist über die komplette Wandstärke hinweg einsetzbar. Es bleibt durch Risse im Stein oder durch Inhomogenitäten weitgehend unbeeinflusst. Es ist auch von der Oberflächenbeschaffenheit des Steinmaterials unabhängig. Es arbeitet zerstörungsfrei und liefert personenunabhängige Messwerte. Es ist außerdem driftarm und insgesamt genau genug, um Restwandstärken zuverlässig zu bestimmen und über einen längeren Zeitraum verfolgen zu können.

**[0016]** Vorzugsweise wird die Wandstärke des Feuerfest-Materials gemessen. Es ist möglich, alle üblichen Feuerfest-Materialien mit dem Verfahren zu untersuchen. Das Verfahren findet nur dort seine Grenze, wo das Feuertest-Material nach langer Standzeit eine korrodierte Oberflächenschicht ausbildet, die durch Eindiffusion von Alkali-Anteilen in das Feuerfest-Material entsteht, wodurch der sprunghafte Unterschied in den Dielektrizitätskonstanten von Feuerfest-Material und Glasschmelze aufgehoben wird. Dies ist bei zirkonhaltigen Feuerfest-Materialien der Fall, deren Wanddicke somit nur solange vermessen werden können bis sich die Korrosionsschicht ver-

messen werden kann. Diese Einschränkung fällt insofern nicht so stark ins Gewicht, als solche Korrosionsschichten sich erst ab Standzeiten von 2 Jahren ausbilden und in diesem Zeitraum die Wanddickenmessungen problemlos durchführbar sind.

**[0017]** Vorteilhafterweise werden Radarwellen mit einer Frequenz von 0,5 bis 2 GHz eingesetzt. Je höher die Frequenz, desto besser ist die Tiefenauflösung. Zwar nimmt dabei auch die Eindringtiefe ab, sie beträgt bei 2 GHz aber immer noch 3 m bei den hier interessierenden Materialien wie Feuerfeststeinen.

**[0018]** Vorzugsweise wird für die Ausführung des Verfahrens ein handelsübliches Radargerät verwendet und zur Überwachung der Wandstärke die Wand des Schmelzaggregates an verschiedenen Stellen vermessen. Dies hat den Vorteil, dass ein Dickenprofil der gesamten Wand erstellt werden kann.

**[0019]** Es hat sich gezeigt, dass der Rauschanteil sehr groß ist, so dass die interessierenden reflektierten Radarpulse im Radargramm u.U. nicht erkennbar sind. Es wird daher ein mathematisches Verfahren zur Auswertung der Radargramme eingesetzt, bei dem der Quotient aus Messwert und Standardabweichung gebildet wird, um das Signal-Rauschverhältnis zu steigern.

#### Ausführungsbeispiel

**[0020]** Beispielhafte Ausführungen werden an Hand der Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

**[0021]** Fig. 1 einen schematischen Messaufbau,

**[0022]** Fig. 2 ein Diagramm der gesendeten Radarpulse,

**[0023]** Fig. 3a, Fig. 3b Diagramme der reflektierten Radarpulse an einem Feuerfest-Material (HZFC-Material) bei Raumtemperatur und bei 1100 °C,

**[0024]** Fig. 4 ein Diagramm der reflektierten Radarpulse bei 1100°C an einer gefüllten Schmelzwanne,

**[0025]** Fig. 5 die mathematisch behandelte Messkurve aus Fig. 4,

**[0026]** Fig. 6 ein Laufzeit-Dicken-Diagramm.

**[0027]** In der Fig. 1 ist ein Glasschmelzaggregat 1 in Form einer Glasschmelzwanne dargestellt, deren Wand innenliegend eine Lage aus Feuertest-Material 2 und außenliegend eine Lage aus Isoliermaterial 4 aufweist. Im Schmelzaggregat 1 befindet sich die Glasschmelze 2.

**[0028]** An der Außenseite der Wand ist der Messkopf 10 an die Isolierschicht 4 angesetzt, der Radar-

pulse aussendet und der die an den Grenzflächen  $G_1$ ,  $G_2$  und  $G_3$  reflektierten Pulse empfängt. Am Messkopf **10** ist eine Auswerteeinheit **11** angeschlossen.

**[0029]** In **Fig. 2** ist das Diagramm der ausgesendeten Radarpulse dargestellt. Es werden Radarpulse der Frequenz 2 GHz und Länge 1 nsec im zeitlichen Abstand von 10 msec ausgesendet, die an allen drei Grenzflächen  $G_1$ ,  $G_2$  und  $G_3$  reflektiert werden, was zu reflektierten Pulsen mit Pulslagen  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  führt, die in den **Fig. 3a**, **Fig. 3b** zu sehen sind.

**[0030]** In der **Fig. 3a** ist ein Diagramm der reflektierten Radarpulse an einer Wand mit HZFC-Material bei Raumtemperatur und in **Fig. 3b** bei 1100 °C dargestellt. In beiden Fällen ist die Schmelzwanne leer. Peaks, die auf Reflexionen an den Grenzflächen zurückzuführen sind, zeigen kleinere Standardabweichungen als die Peaks von zufälligen Reflexionen, so dass diese deutlicher sichtbar sind. In der **Fig. 3a** sind die Dicken der Isolierschicht (84 mm) und der Feuerfest-Schicht (237 mm) eingetragen. Aus dem Laufzeitunterschied der Pulslagen  $P_2$  und  $P_3$  lässt sich über die Formel  $\text{Dicke} = (P_3 - P_2) \cdot F$  die Dicke der Feuerfestschicht **3** aus HZFC-Material ermitteln.

**[0031]** Im vorliegenden Beispiel beträgt der Faktor  $F = \frac{250}{88,6}$ , der aus einer Kalibrierungsmessung an der ungefüllten aber heißen Schmelzwanne ermittelt wird, von der man die genaue Geometrie, d.h. die Dicken an verschiedenen Stellen kennt.

**[0032]** Ein Vergleich der **Fig. 3a** und **Fig. 3b** zeigt, dass die Pulslagen  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  zeitlich gedehnt sind, was darauf zurückzuführen ist, dass bei hohen Temperaturen die dielektrische Konstante des Feuerfest-Materials einen anderen Wert annimmt.

**[0033]** In der **Fig. 4** ist ein Radargramm einer mit Glasschmelze gefüllten Schmelzwanne gezeigt, die ebenfalls Feuerfest-Material aus HZFC-Material aufweist. Dieses Diagramm unterscheidet sich von dem in **Fig. 3b** gezeigten Diagramm bezüglich der Pulslagen nicht.

**[0034]** Um die Pulslagen  $P_2$ ,  $P_3$  besser ermitteln zu können, wurde auf die Messwerte des Diagramms der **Fig. 4** die Quotientenbildung aus Messwert und Standardabweichung angewendet, was zum Diagramm der **Fig. 5** führt. In diesem Radargramm ist deutlicher die Lage  $P_2$  und  $P_3$  der an  $G_2$  und  $G_3$  reflektierten Radarpulse zu sehen, so dass daraus die Wanddicke der HZFC-Schicht nach der oben genannten Formel berechnet werden kann.

**[0035]** Ein entsprechendes Laufzeit-Dicken-Diagramm, das die Umrechnung der Pulsabstände in Wanddicken erlaubt, ist in **Fig. 6** dargestellt. Auf der y-Achse sind die zeitlichen Pulsabstände durch korrespondierende Datenpunkt-Nummern des Auswer-

teprogramms gekennzeichnet.

#### Bezugszeichenliste

<b>1</b>	Schmelzaggregat
<b>2</b>	Glasschmelze
<b>3</b>	Feuerfest-Material
<b>4</b>	Isoliermaterial
<b>10</b>	Messkopf
<b>11</b>	Auswerteeinheit
<b>G<sub>1</sub></b>	Grenzfläche/Isoliermaterial
<b>G<sub>2</sub></b>	Isoliermaterial/Feuerfest-Material
<b>G<sub>3</sub></b>	Feuerfestmaterial/Glasschmelze

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Messung der Wandstärke von mit Schmelze gefüllten Schmelzaggregaten, deren Wand mindestens eine Schicht aus Feuerfest-Material aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, dass Radarwellen an der Außenseite in die Wand eingestrahlt werden, dass die an dielektrischen Übergängen reflektierten Radar-Strahlen gemessen werden und dass aus den der Laufzeit des dem Übergang Wandinnenseite – Glasschmelze entsprechenden Reflexen die Wandstärke ermittelt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Wandstärke des Feuerfestmaterials gemessen wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass Radarwellen einer Frequenz von 0,5 bis 2 GHz eingestrahlt werden.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Wand des Schmelzaggregates an verschiedenen Stellen vermessen wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass zur Unterdrückung der Rauschanteile der Quotient aus Messwert und Standardabweichung gebildet wird.

Es folgen 6 Blatt Zeichnungen

Fig.1

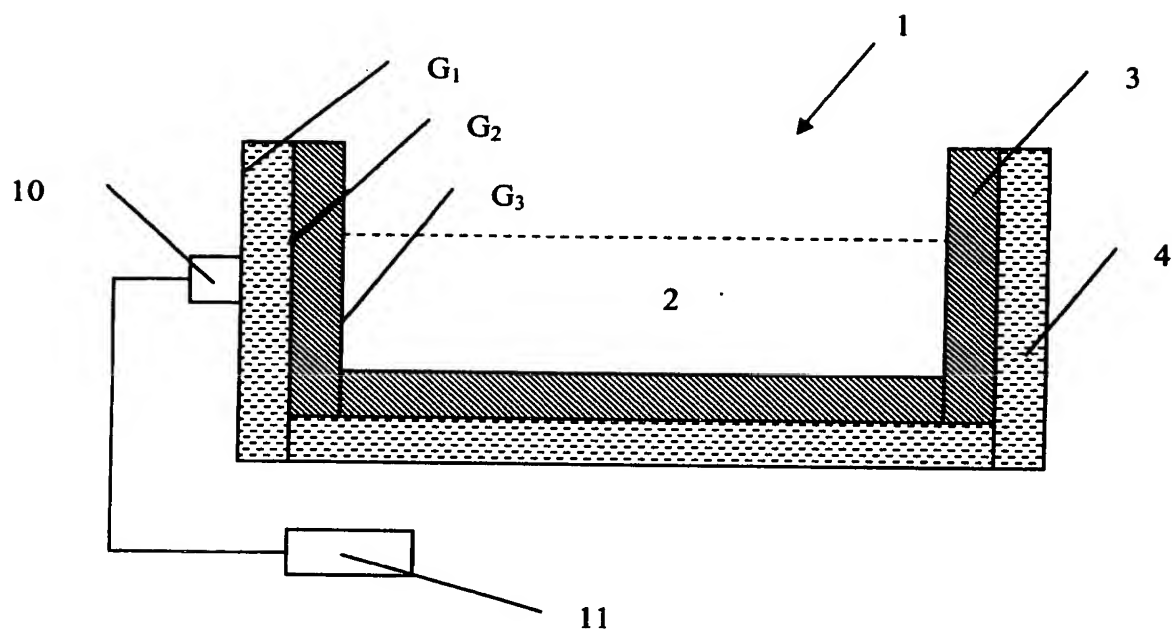


Fig. 2

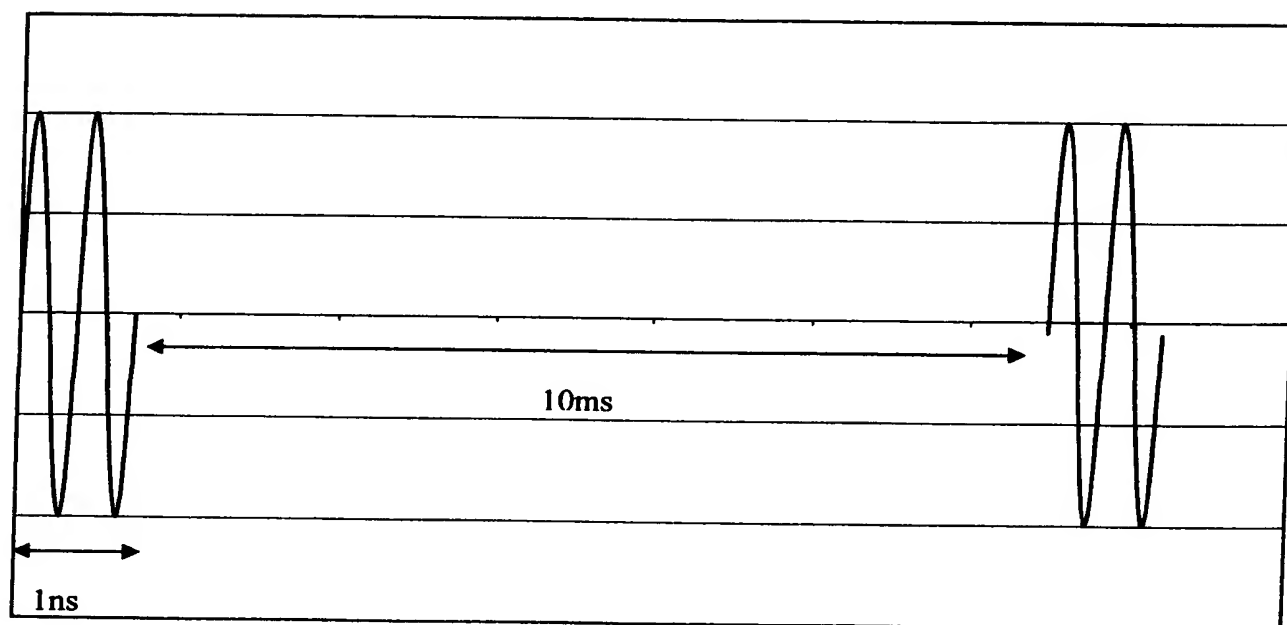


Fig.3a

Stein kalt

$$\text{Steindicke} = (P_3 - P_2) \cdot \frac{250}{88.6}$$

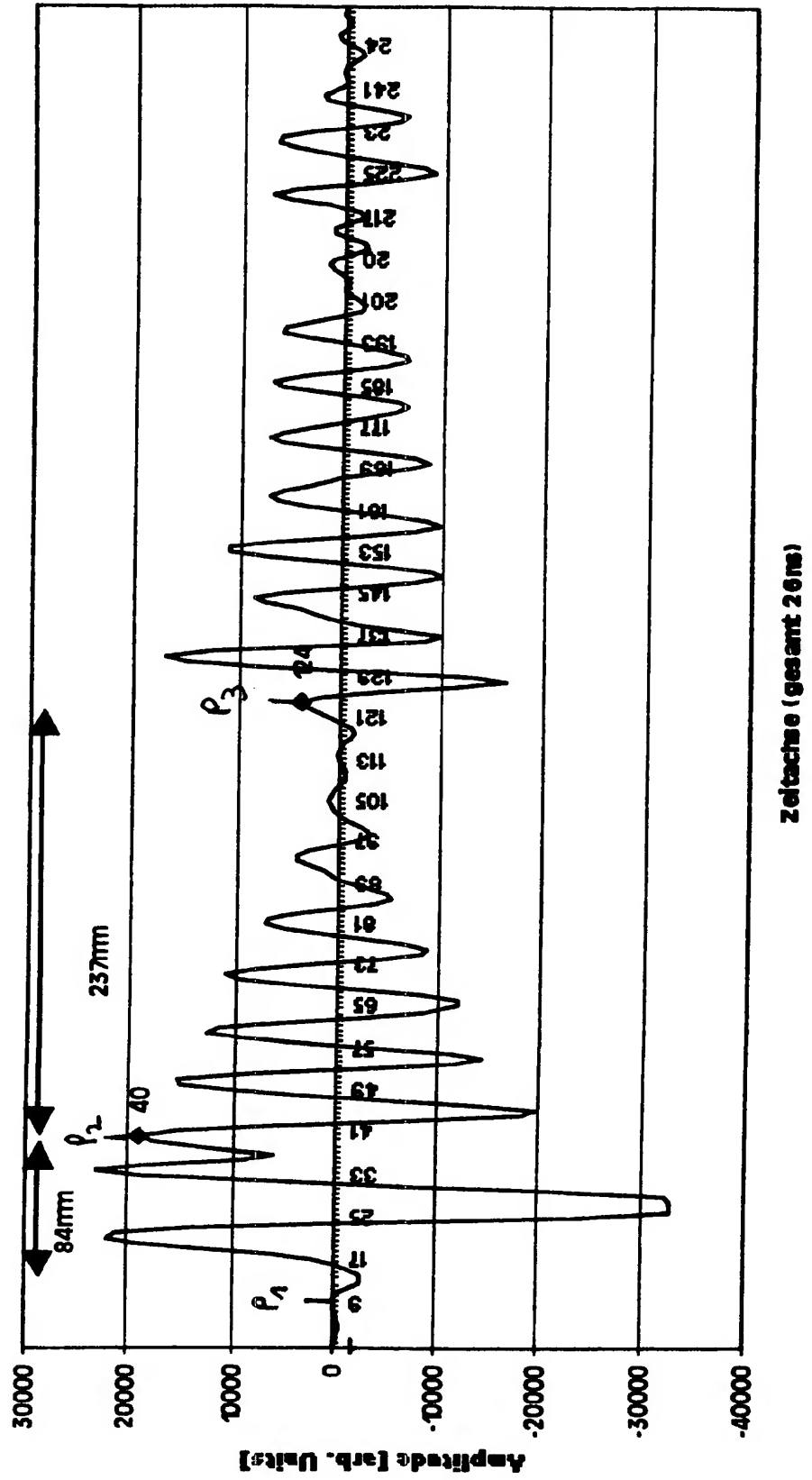


Fig. 3b:

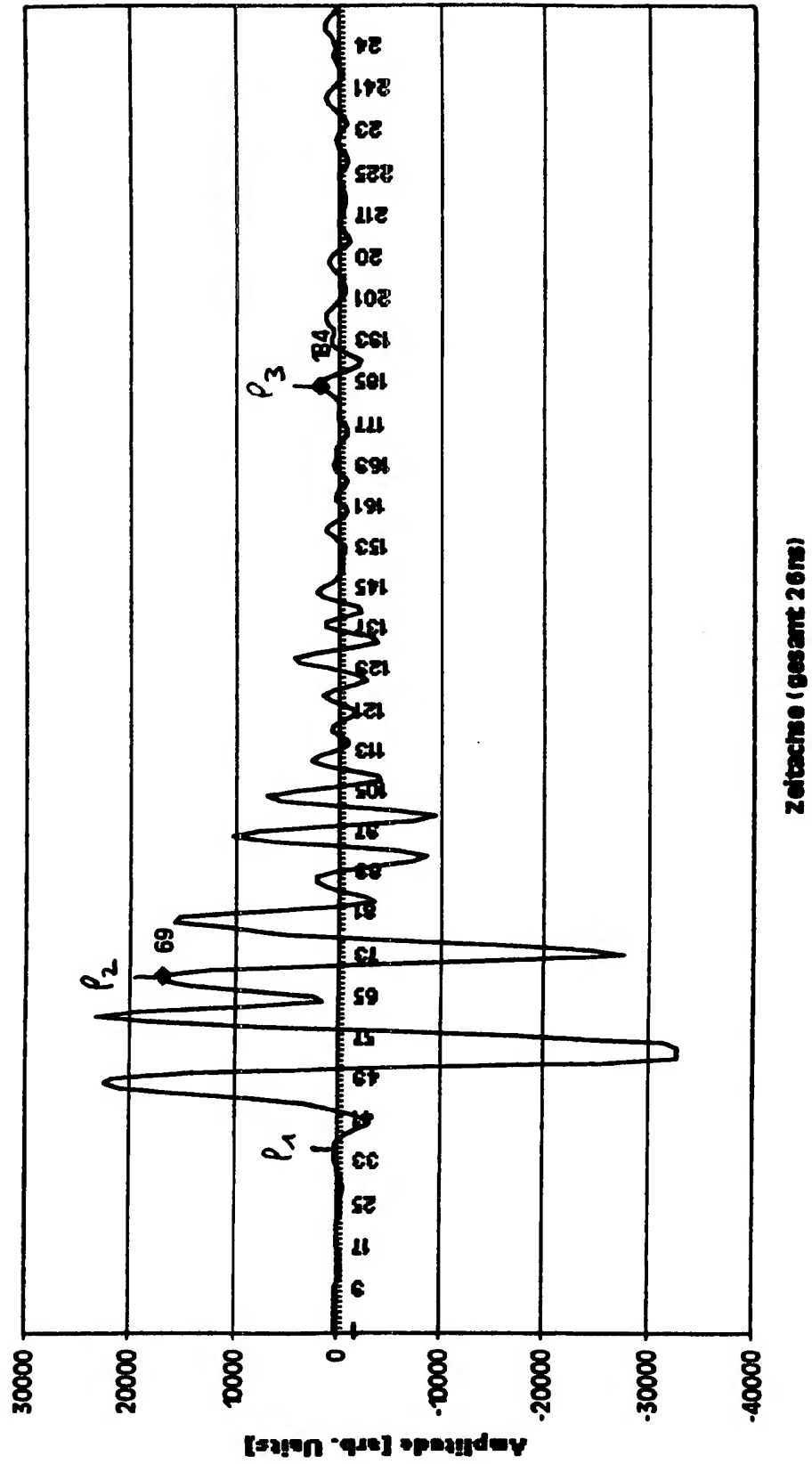


Fig. 4

Stein heiß

$$\text{Steindicke} = (P_3 - P_2) \cdot \frac{250}{141}$$

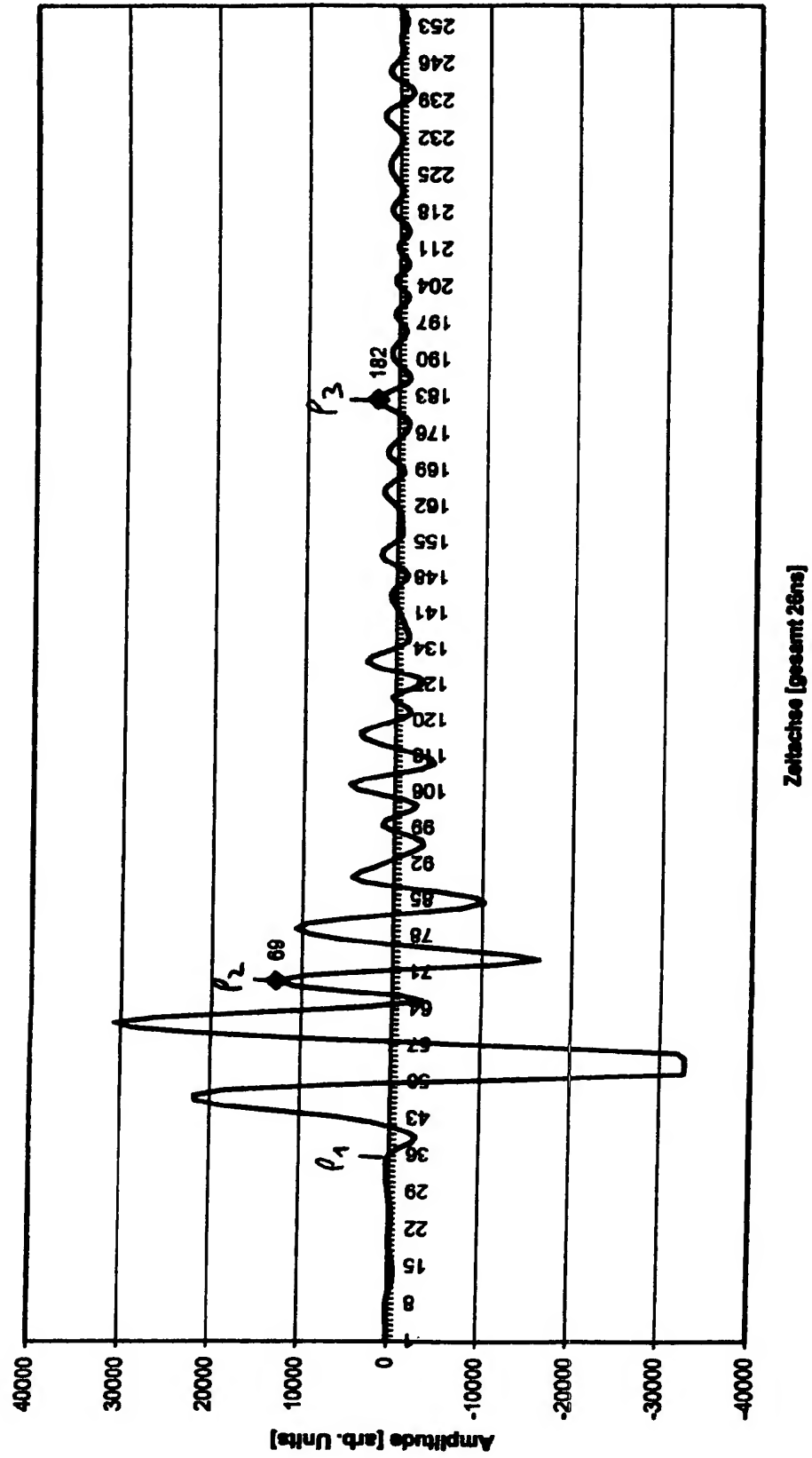




Fig. 5

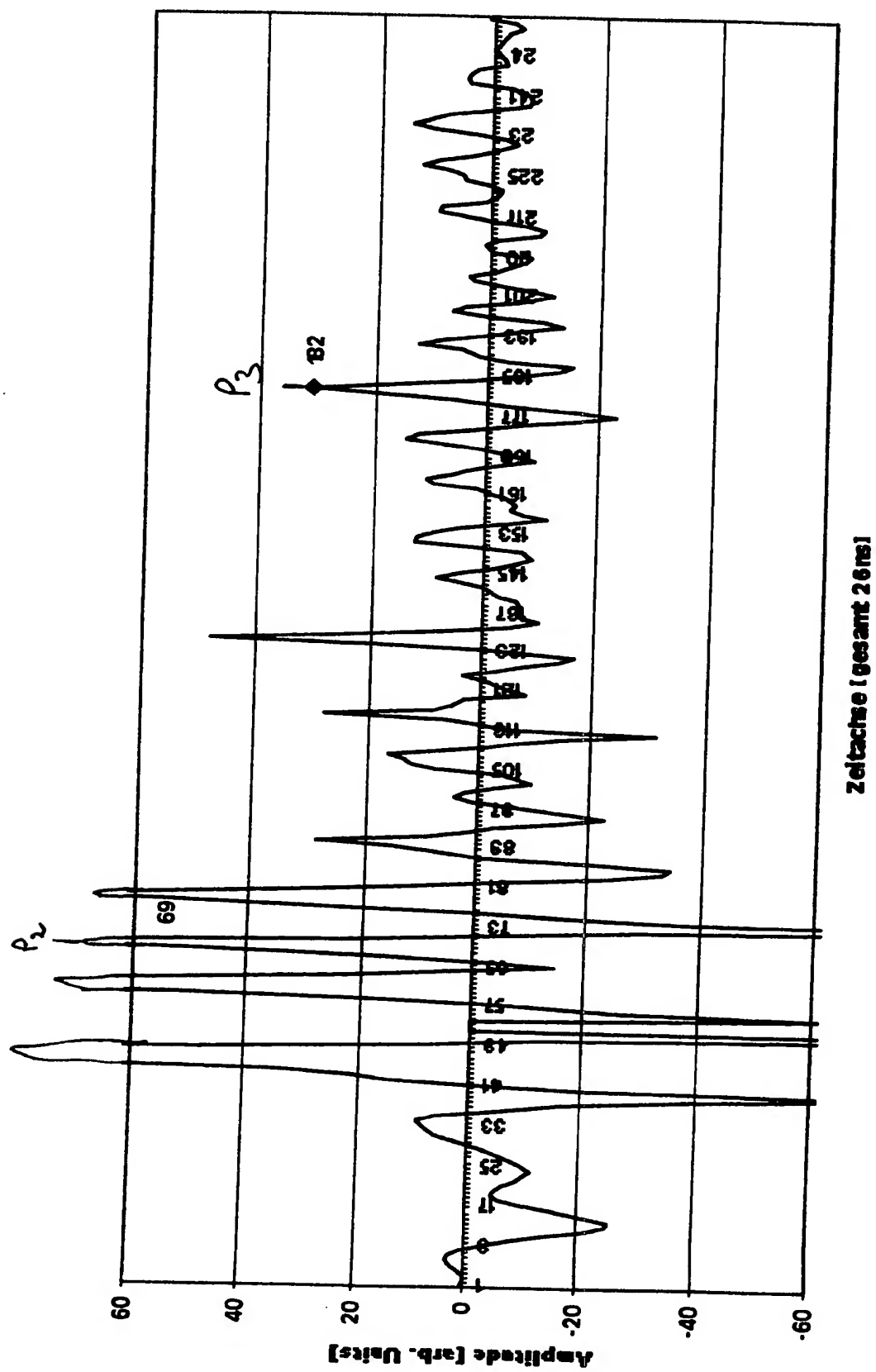


Fig. 6

